

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЛНИИ И СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СОВРЕМЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

© 2016 г. С.А. СОКОЛОВ

Московский технический университет связи и информатики
e-mail: stanislav.a.sokolov@gmail.com

Распространённо заблуждение, что полностью диэлектрический оптический кабель не подвержен воздействию электромагнитного поля молнии, однако это неверно. Свет имеет электромагнитную природу и реагирует на внешнее поле, под действием которого в волокне происходит поворот плоскости поляризации распространяющейся волны, что может привести к возникновению сбоев и помех. Проведённые в последние годы исследования молнии показали, что молния не только характеризуется большой величиной тока и электромагнитного поля, но также генерирует гамма-кванты с энергией порядка 10-15 МэВ, попадание которых в оптическое волокно производит разрушение структуры волокна. Подвеска кабеля на опорах линий электропередачи выявила новый вид разрушения оптического кабеля – пробой вдоль поверхности кабеля, приводящие к его разрушению за несколько месяцев. Стальные и металлизированные покрытия не обеспечивают достаточную защиту от воздействий.

Последствия поворота плоскости поляризации

Поворот плоскости поляризации передаваемого сигнала под действием внешнего поля не приводит к повреждению кабеля, а лишь несколько меняет поляризацию волны и создаёт дополнительную поляризационную модовую дисперсию (ПМД). Некоторые элементы линии могут быть чувствительными к ПМД, поэтому возможно искажение сигналов. Различным образом поляризованные волны света при падении на плоскую поверхность имеют разные величины Френелевских коэффициентов. Изменение плоскости поляризации света в оптическом волокне может также привести к так называемому двойному лучепреломлению и возникновению двух ортогональных составляющих волны, между которыми распределится первоначальная энергия сигнала. Каждая из составляющих будет распространяться независимо друг от друга. Так как параметры волокна вдоль различных плоскостей, проходящих через ось, могут несколько отличаться, следствием может явиться увеличение дисперсии и затухания сигнала, аналогичные поляризационной модовой дисперсии при геометрических неоднородностях волокна. Развитие систем волнового мультиплексирования со всё возрастающим числом несущих привело к тому, что в одном окне прозрачности может передаваться несколько десятков, а то и сотен волн, сдвинутых друг относительно друга на доли нм. Поэтому поворот плоскости поляризации для всех волн будет разным, и при прочих равных условиях короткие волны сместятся на больший угол по сравнению с длинными волнами. Если первоначально все волны имели одну и ту же (например, вертикальную) поляризацию и распространялись вдоль одной из главных осей (так как волокно имеет некоторую эллиптичность), то после поворота у коротких волн появятся относительно большие составляющие вдоль горизонтальной оси, в то время как длинные волны будут иметь относительно большие вертикальные составляющие. В результате при дальнейшем распространении длинные волны будут иметь значительную составляющую с вертикальной поляризацией, а короткие волны иметь большую составляющую с горизонтальной поляризацией. К оптическому усилителю подойдут па-

кеты волн с разной поляризацией, что может создать проблемы в фильтрах и изоляторах. К поляризации чувствительны некоторые типы усилителей, например, полупроводниковые лазерные и Рамановские усилители. Известно также, что короткие и длинные волны распространяются с разной скоростью вследствие зависимости коэффициента преломления от длины волны, и в результате воздействия молнии возникает дополнительная поляризационная модовая дисперсия. Если используется ортогональное мультиплексирование с одновременной передачей по волокну волн с горизонтальной и вертикальной поляризацией, то составляющие, имевшие первоначально только вертикальную поляризацию после поворота плоскости поляризации под действием внешнего поля могут оказаться частично наложенными на основные волны с горизонтальной поляризацией, что ещё больше увеличит риск ошибок. К сожалению, в настоящее время отсутствуют какие-либо правила и регламентирующие документы по определению подобной опасности и защите от неё. Имеется также некоторая неопределённость в точности определения величины K , величина которой может зависеть от технологии изготовления волокна. Тем не менее, грозовое воздействие на оптический кабель, даже не содержащий металлических элементов, будет проявляться и может быть достаточно опасным при передаче современных каналов большой ёмкости со скоростью в несколько терабит/сек, и цена ошибок при приёме таких сигналов очень велика.

Новые открытия в исследовании молнии и отсутствие соответствующих стандартов

За последние годы выявилось отсутствие или отставание от запросов практики существующих документов по защите цепей слабого тока и линий связи от внешних электромагнитных влияний. В то же время продолжался процесс миниатюризации электронных устройств и устройств автоматики и повышение их чувствительности к внешним электромагнитным воздействиям. Интересные открытия были сделаны в области изучения молнии и других электромагнитных явлений в атмосфере, а так же в области создания средств защиты.

При процессах образования грозových разрядов внутри облака одновременно возникают рентгеновское, γ -излучение и электрон-позитронные пары. Энергия излучаемых квантов может достигать величины 100 МэВ. Процесс эмиссии квантов кратковременен и не превышает 1 мкс и всегда связан с лидерной стадией. Почему поле вырастает до весьма больших величин и точный механизм пробоя с возникновением радиации с большой энергией, к сожалению, пока не совсем ясен. При облучении оптического волокна возникают дефекты, на них легко создаются электроны проводимости и дырки, начинают играть роль примеси. Эти дефектные точки поглощают свет в некоторых частях спектра, поэтому они называются центрами окраски. Многие процессы носят временный характер, и явления исчезают после прекращения облучения, если доза облучения не слишком велика. Но иногда процесс восстановления занимает время, длящееся годами. Это в значительной степени зависит от технологии изготовления волокна, скорости и температуры вытяжки, режима охлаждения и т.д. Наибольшую радиационную стойкость имеют волокна на основе чистой двуокиси кремния. Примеси, особенно ОН, изменяют стойкость волокна, активизируют возникновение дефектных центров. Увеличению радиационной стойкости способствует только добавление бора. Увеличения радиационной стойкости можно добиться также с помощью "радиационного отжига" – устранения слабых мест и их разрушения. В этой связи, волокна с отсутствием водяного пика могут оказаться более чувствительны к радиационным воздействиям. При импульсном облучении оптические потери достигают более высоких значений чем при стационарном. В случае полимеров ионизирующее излучение существенно изменяет их макроскопические свойства, нарушая связи полимерных цепочек. Особенно подвержены воздействию радиационных облучений кабели, проложенные на высоте порядка 2000 м над уровнем моря. В этом случае количество гамма-квантов большой энергии в атмосфере сильно возрастает. В горной местности и вблизи высот-

ных сооружений возрастает число восходящих молний, направленных от земли к облаку, что также способствует увеличению гамма-квантов большой энергии.

Подвеска оптических кабелей на опорах линий передачи энергии

При подвеске оптических кабелей на опорах линий электропередачи возможно увлажнение поверхности неметаллической оболочки подвесного оптического кабеля при дожде, росе, тумане и её загрязнение вследствие выветривания поверхности земли, выброса промышленных отходов и т.п. Количество загрязняющего вещества на поверхности оболочки не постоянно и зависит от условий погоды. Дождь часть грязи растворяет и смывает. Увлажнение загрязнённых поверхностей приводит к растворению солей осадка и резкому увеличению поверхностной проводимости. Через каждый миллиметр окружности, ограничивающей сечение кабеля, проходит в среднем ток от долей до нескольких миллиампер. При протекании таких токов проводящий слой разогревается, но реально разогрев происходит неравномерно. Поверхностная плотность тока тем больше, чем меньше диаметр кабеля и чем больше загрязнённая поверхность. Влага испаряется, причём также неравномерно. Испарение влаги приводит к местному увеличению сопротивления слоя грязи. Подсушивание отдельных участков вызывает увеличение плотности тока на остальных участках окружности, ускоренный их нагрев и образование подсушенной кольцевой зоны с повышенным сопротивлением. В результате падение напряжения на этом участке увеличивается до тех пор, пока не происходит пробой по поверхности, что приводит к образованию в этом месте частичной электрической дуги, шунтирующей часть пути. Образование частичных дуг при длительном воздействии напряжения неизбежно, поскольку подсушка слоя загрязнения имеет место после окончания процесса увлажнения. Приложенного напряжения (вследствие наличия электромагнитного поля) в подобных случаях обычно бывает достаточно для перекрытия маленького воздушного промежутка длиной в несколько миллиметров. Таков механизм развития разряда по поверхности кабеля. При протекании тока и особенно при возникновении дуги выделяется тепло, и происходит нагрев поверхности, а в некоторых случаях и расплавление оболочки. Подобные процессы очевидно повторяются. Загрязнение и увлажнение имеют частоту появления, совпадающую с частотой появления дождей и туманов. В результате повторения подобных процессов кабель постепенно разрушается. Наблюдения за оптическими кабелями, подвешенными к опорам контактной сети транссибирской железной дороги показали, что в этом случае характерными повреждениями и явлениями являются:

- 1) Возникновение коронных разрядов и разрушение поддерживающих зажимов;
- 2) появление вздутий оболочки между опорами. Вздутия возникают вследствие нагрева оболочки и выделения содержащейся в ней паров воды;
- 3) токи утечки на поверхности обычно составляют примерно единицы миллиампер и увеличиваются при плохих заземлениях опор;
- 4) разность потенциалов между точками на оболочке может достигать величины 20 кВ;
- 5) выделяемая мощность при пробоях порядка 2-7 Вт; имеет место поляризация молекул;
- 6) чистая оболочка имеет сопротивление порядка 500 МОм/см; со временем оболочка становится пористой, загрязнённой; грязь плотно сцепляется с оболочкой; поверхностное сопротивление снижается до 2 кОм/см при безопасном уровне в 20-25 Мом/см;
- 7) напряжённость электрического поля может достигать 30 кВ/м, что приводит к ионизационным процессам вблизи металлических поддерживающих зажимов; возникают коронные и перемежающиеся частичные разряды; иногда коронный разряд переходит в дуговой, при этом происходит деградация поверхности, выделение озона и окислов азота, и при наличии влажности – образование азотной кислоты и разъедание оболочки;

8) так как вблизи опор кабель не является строго горизонтальным, поэтому резко увеличивается продольная составляющая напряжённости электрического поля.

Средства защиты

Применяемые на практике металлические экраны не всегда обеспечивают надёжную защиту. Например, экран из металлизированных покрытий защищает волокно от квантов с энергией только до нескольких десятков кэВ, тогда как кванты с энергией в 10-15 МэВ через такие экраны проникают свободно. Стальная лента толщиной в несколько мм также не может существенно уменьшить число проникающих гамма-квантов. Уменьшение числа мощных квантов вдвое происходит только при толщине ленты в 2 см, поэтому основные меры защиты должны определяться составом и технологией изготовления стекла путём внесения легирующих добавок. Так как основное и наиболее губительное действие электромагнитного поля молнии происходит в течение сравнительно короткого времени порядка нескольких сотен миллисекунд, и в некоторых случаях возможна релаксация, то очевидно имеет смысл на некоторых линиях в зависимости от их назначения допустить возможность кратковременных сбоев. Для подвесных кабелей большое значение имеют материалы внешней оболочки кабеля.

Выводы

Полностью диэлектрические оптические кабели подвержены воздействию внешних электромагнитных полей как при ударах молнии, так и при влиянии высоковольтных линий электропередачи и других источников. При использовании волнового или ортогонального уплотнения с передачей сразу нескольких десятков или сотен волн в одном окне прозрачности во время удара молнии вблизи проложенного в земле кабеля может произойти поворот плоскости поляризации передаваемых волн на различный для каждой волны угол. Это вызовет сбой в передаче информации по крайней мере на несколько сотен миллисекунд во всех каналах и возникновение дополнительной ПМД. Кабели проложенные в горах или возвышенной местности на высоте порядка 2000 м над уровнем моря могут подвергаться воздействию мощного гамма-излучения при разрядах молнии. Особенно опасно воздействие для полимерных кабелей. Размеры повреждений и возможность релаксации зависит от состава и технологии изготовления волокна и наличия примесей. Оптические кабели, подвешенные на опорах высоковольтных линий электропередачи и контактных линий электрифицированных железных дорог, подвержены воздействию электромагнитных полей вследствие загрязнения и увлажнения поверхности кабелей. При этом по поверхности оболочек подвешенных кабелей протекают токи, что приводит к поверхностным пробоям и другим нежелательным явлениям. Существующие меры защиты не всегда эффективны и до конца не разработаны. Отсутствуют также стандарты и правила защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов С.А.* Оценка возможного воздействия гамма-излучения молнии на оптические кабели. *Электросвязь*, №5, 2016. С. 50-54.
2. V Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург. 17-19 мая 2016 г. Сборник докладов. С. 404.
3. *Филиппов Ю.И. и др.* Электротермическая деградация оптического кабеля. *Lightwave*. Русское издание. № 3 и № 4, 2006.